

УДК 681.51, 621.039

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.33.2.015](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.33.2.015)

Экспериментальное моделирование переходных теплогидравлических процессов в энергетической установке

В.С. Братыгина, А.А. Сатаев, Д.И. Новиков, В.И. Мельников

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

Резюме: Имея полувековой опыт проектирования и эксплуатации судовых ядерных энергетических установок, при проектировании новых установок борьба ведется за повышенные ресурсные характеристики оборудования и, в особенности, ресурс активной зоны реактора. Для достижения необходимого результата проводится глубокий анализ всех физико-химических процессов, происходящих в основном оборудовании реакторной установки. Важную роль в этой работе играет исследование переходных теплогидравлических процессов. Такие процессы являются инерционными и вносят в систему колебательные возмущения первого порядка малости. Так же важно исследовать системы на динамическую устойчивость. Эта сторона исследования важна не только для судовых установок с присущей им маневренностью, но и энергоблокам большой энергетики. Анализ и исследование математических моделей является затруднительным процессом, поскольку даже для самой простой двухконтурной установки такая модель будет состоять из нескольких нелинейных дифференциальных уравнений. В этом случае целесообразно прибегать либо к численным методам, либо к упрощенным математическим моделям. Для исследования переходных теплогидравлических процессов в рамках этой работы использовался экспериментальный стенд ФТ-100, представляющий собой модель двухконтурной установки. Были реализованы несколько режимов номинальной работы. Полученные результаты были проверены на согласование с простейшей математической моделью, и могут служить исходными для дальнейшего расчета параметров установки. Также ценность полученного массива данных заключается в возможности верификации расчетных кодов динамики и систем автоматического управления. Данные коды являются ценным инструментом при проектировании, получение новых экспериментальных данных помогает увеличить точность расчета.

Ключевые слова: переходные процессы, динамические характеристики, модель ядерной установки, экспериментальное моделирование, скачкообразный переход, нормальные режимы эксплуатации.

Для цитирования: Братыгина В.С., Сатаев А.А., Новиков Д.И., Мельников В.И. Экспериментальное моделирование переходных теплогидравлических процессов в энергетической установке. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=892>. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.015

Experimental modeling of transient thermohydraulic processes in a power plant

V.S. Batygina, A.A. Sataev, D.I. Novikov, V.I. Melnikov

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev»,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

Abstract: Having half a century of experience in the design and operation of marine nuclear power plants, when designing new installations, the struggle is for increased resource characteristics of equipment and, in particular, the resource of the reactor core. A deep analysis of all physical and chemical processes occurring in the major equipment of the reactor plant is carried out to achieve the desired result. The study of transient thermohydraulic processes plays an essential role in this work. Such activities are inertial and introduce vibrational perturbations of the first order of smallness into the system. It is also crucial to investigate systems for dynamic stability. This aspect of the study is important not only for ship installations with their inherent maneuverability but also for large-scale power units. Analysis and research of mathematical models is a cumbersome process. The reason is that even for the simple double circuit unit, such a model will consist of several nonlinear differential equations. In this case, it is advisable to use either numerical methods or simplified mathematical models. To study the transient thermal-hydraulic processes, an experimental stand FT-100 was used, which is a model of a two-circuit installation. Several nominal operation modes were implemented. The results obtained are checked for agreement with the simplest mathematical model and can serve as a starting point for further calculation of the installation parameters. Also, the value of the obtained data array lies in the possibility of verifying the calculated codes of dynamics and automatic control systems. These codes are a valuable tool in design. New experimental data acquisition helps to increase the accuracy of the calculation.

Keywords: transient processes, dynamic characteristics, model of a nuclear plant, experimental modeling, jump transition, normal operating modes

For citation: Bratygina V. S., Sataev A. A., Novikov D. I., Melnikov V. I. Experimental modeling of transient thermohydraulic processes in a power plant. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=892> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.015 (In Russ).

Введение

Дальнейшее совершенствование конструкции ядерных энергетических установок, улучшение расчетных методик, выбор экономичных и безопасных режимов работы неразрывно связано с получением новой, все более полной информации о теплофизических процессах в оборудовании реакторной установки. При создании судовых реакторных установок нового поколения основным требованием является максимально повышенная ресурсная характеристика элементов оборудования, а в особенности активной зоны. С точки зрения проектирования, необходимо минимизировать факторы воздействия на ресурсную характеристику для повышения технико-экономических показателей [1], [2]. Если говорить именно о судовых реакторных установках, то к ним предъявляются серьезные требования по условию работы с интенсивными динамическими режимами с высокой скоростью изменения мощности и без ограничения глубины и количества маневров [3]. В таком случае необходимо проводить исследования динамических характеристик и переходных режимов. Исследование именно этих процессов дополняет рассмотрение статических характеристик. Статические зависимости объекта можно получить, исследуя математическую модель объекта при условии, что все временные производные равны нулю, то есть в предположении отсутствия или постоянства внешних воздействий [4]. Они обладают ограниченным набором получаемых данных в рамках исследования и не могут в достаточной полноте дать описание происходящих процессов.

Так, например, авторами работы [5] описывается математическая модель теплофизических процессов для динамической связи реактор-парогенератор. Семенов и Вольман основываются на необходимости построения математической модели более высокого порядка, поскольку необходимо дать наиболее полное и точное описание в

условиях запаздывающего фронта температурной волны. Также отмечается целесообразность применения и численных моделей динамики реакторной установки. Стоит так же обратить внимание на работу Будникова, Савихина и Чистова [6]. В ней подробно описываются численные модели нестационарного теплообмена, а так же приводятся примеры расчета переходного процесса в системе реактор-парогенератор. Ценность работы заключается в сравнение методов решения и применима к описанию модельного эксперимента.

Гусев, Казанский и Витковский в своей работе [7] изложили и обсудили результаты экспериментов по исследованию динамической устойчивости энергоблока с реактором типа ВВЭР. Данные эксперименты проводят во время пусконаладочных работ для обоснования динамической устойчивости энергоблока и сбора информации, которая будет использована в последующих проектах. В программу экспериментов входили следующие режимы: останов одного из четырёх главного циркуляционного насоса на номинальной мощности реактора, останов питательного электронасоса без его резервирования на номинальной мощности и сброс нагрузки турбогенератора с номинального уровня до уровня нужд собственных потребителей.

В рамках исследования динамических режимов и нестационарных процессов можно выделить несколько основных задач [8]:

- Определение условий проведения «нормальных» переходных режимов. Это режимы, в которых реализуется переход с одного уровня мощности на другой.

- Исследование на устойчивость отдельных видов систем, входящих в состав ядерной энергетической установки. Первоочередное внимание уделяется устойчивости парогенератора.

- Определение теплофизических условий работы тепловыделяющих элементов. В нестационарных режимах могут изменяться параметры по запасам относительно критической тепловой нагрузки, температуре и прочим параметрам.

- Гидродинамические исследования устойчивости реактора, парогенератора с целью определения конструктивных схем и соответствующих параметров, при которых обеспечивается необходимая стабильность течения в рабочих условиях.

- Обоснование требований к системам управления, регулирования и защиты, включая исполнительные органы, в соответствии с динамическими характеристиками реактора и установки в целом.

Перечисленные задачи охватывают нейтронно-физические и теплогидравлические процессы. В особых случаях необходимо рассматривать вкуче с фазовыми переходами среды. Эти процессы сложным образом распределены во времени и пространстве, поэтому необходимо использовать численные методы и мелкомасштабные модели для их исследований.

Материалы и методы

В рамках данной работы было проведено экспериментальное исследование переходных теплогидравлических процессов в модели двухконтурной паропроизводящей установки. Так же рассмотрены основные уравнения для расчетного моделирования этих процессов для данной установки.

Экспериментальное исследование проводилось в лаборатории «Лабораторный комплекс экспериментальных теплофизических стендов» кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» на исследовательском стенде ФТ-100 [8], принципиальная схема которого представлена на Рисунке 1. Стенд является теплогидравлическим и представляет собой модель двухконтурной установки, источник тепла – электрообогрев. В состав установки входят: электродвигатель с двумя секциями нагревателей ЭК-1

(нерегулируемая $N=20$ кВт) и ЭК-2 (регулируемая $N=0-20$ кВт), теплообменник I-II контура, теплообменник II-III контура, циркуляционные насосы ЦН-1 и ЦН-2 в первом и втором контуре соответственно, расширительные цистерны, система воздушников и дренажей, трубопроводы и арматура, средства теплофизического контроля, шкафы управления контрольно-измерительными приборами и автоматики, программно-технический комплекс. Первый и второй контура установки – замкнутые, отвод тепла от второго контура осуществляется разомкнутым третьим контуром.

В ходе работы, при помощи контрольно-измерительных приборов фиксировалась температура в различных точках установки (в соответствии с принципиальной схемой) в течение всего времени проведения эксперимента. Первоначально стенд находится в «холодном» состоянии с обеспечением циркуляции. В результате были получены графики – динамические характеристики установки. Интерес в ходе данной работы представляют точки T1-1, T1-2, T2-1, T2-2.

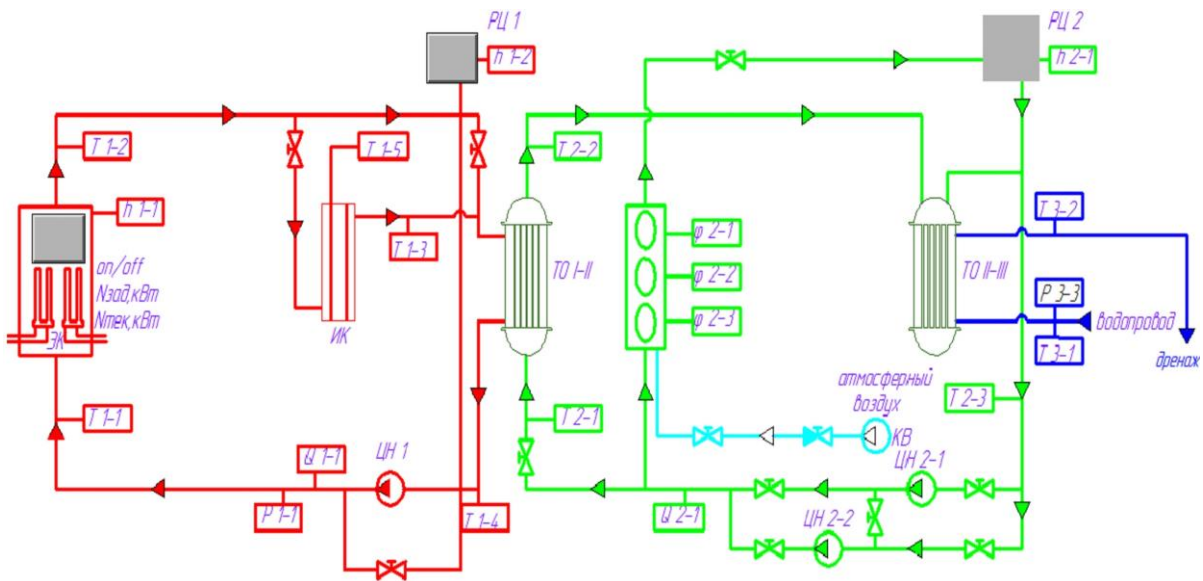


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментального стенда
 Figure 1 – Schematic diagram of the experimental stand

Математическое описание нестационарных процессов в ядерной энергетической установке можно найти в фундаментальных трудах Митенкова Ф. М., Моторова Б. И., Саркисова А.А. Их работы в области динамики ядерных установок и нестационарных процессов ложатся в основу исследования. Однако полученные системы включают в себя нелинейные уравнения в частных производных, что делает затруднительным не только аналитическое, но и численное её исследование даже при наличии вычислительных мощностей настоящего времени. Строго говоря, в рамках исследования теплофизических процессов на стенде, система дифференциальных уравнений, описывающая переходные режимы даже простейшей двухконтурной установки, весьма сложна. Целесообразно будет использовать приближенное описание динамической характеристики в виде уравнения:

$$(c_m \cdot m_m + c_{p1} \cdot m_{p1}) \cdot \frac{dt_{cp}}{dt} = N - kF(t_{cp} - t_{bx}), \quad (1)$$

где c_m, m_m – теплоёмкость и масса металл оборудования первого контура; t_{cp} – средняя температура первом контуре, t_{bx} – температура среды второго контура на входе в теплообменник.

Результаты

В ходе экспериментальной работы реализовывались следующие режимы:

1. Скачкообразное повышение мощности установки при постоянных расходах теплоносителей первого и второго контуров. Начальная мощность электрообогревателя $N=5$ кВт, после выхода установки на стационарное состояние, мощность увеличивалась на 5 кВт, до 40 кВт включительно. Динамические характеристики данного режима для этого режима представлены на Рисунке 2.

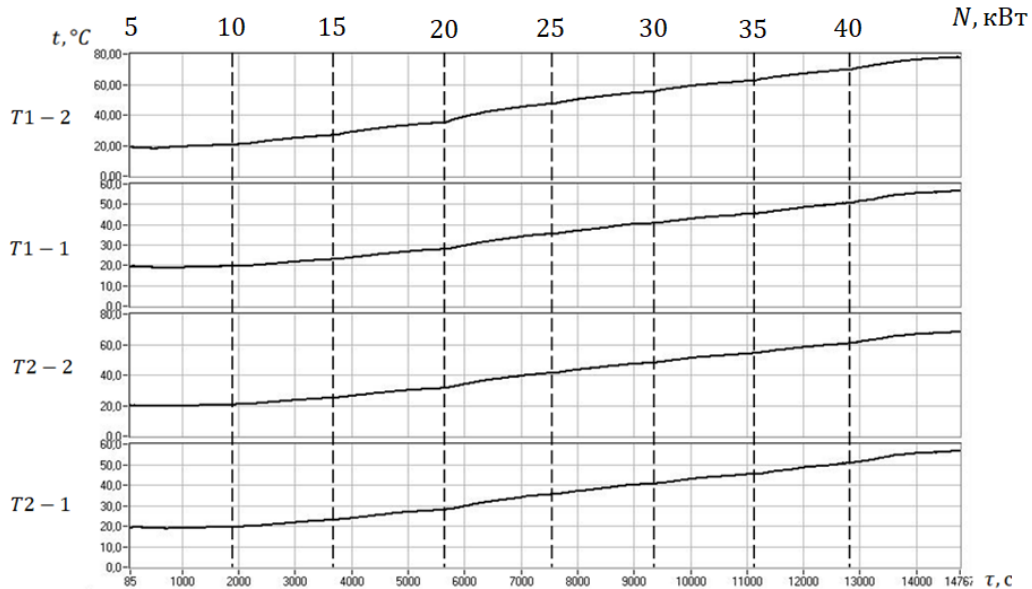


Рисунок 2 – График переходного процесса при скачкообразном изменении мощности
 Figure 2 – Diagram of the transition process with a sudden change in power

2. Изменение расхода теплоносителя во втором контуре от номинального до четверти номинального, с шагом в 25 % номинального расхода. Мощность поддерживалась постоянной и равнялась $N=10$ кВт, расход по первому контуру составлял $G_1=4$ м³/час. Динамические характеристики данного режима представлены на Рисунке 3.

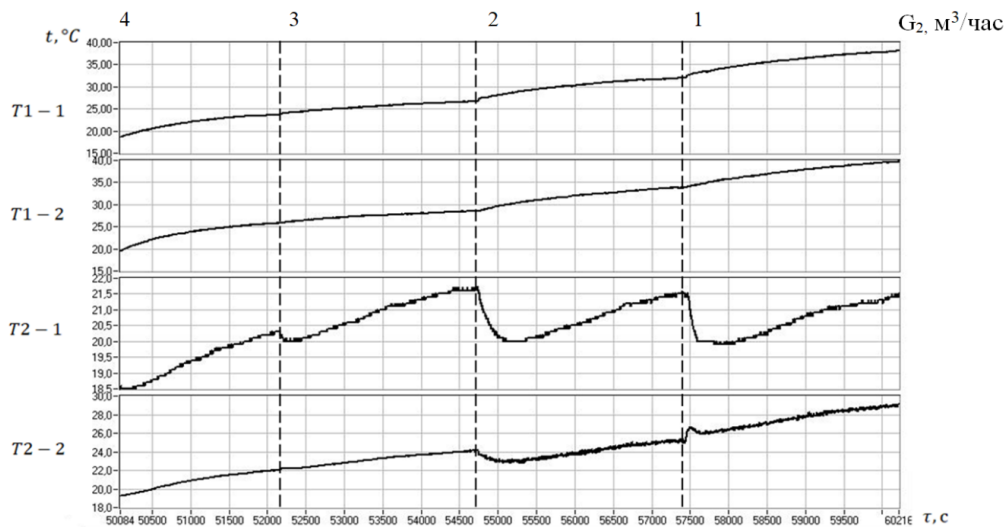


Рисунок 3 – График переходного процесса при изменении расхода теплоносителя второго контура
 Figure 3 – Diagram of the transition process when the flow rate of the second circuit changes

3. Изменение расхода теплоносителя в первом контуре от номинального до нуля. Мощность оставалась постоянной и равнялась $N=25$ кВт, расход по второму контуру составлял $G_2=4$ м³/час. Номинальный расход по первому контуру $G_1=4$ м³/час. Динамические характеристики данного режима представлены на Рисунке 4.

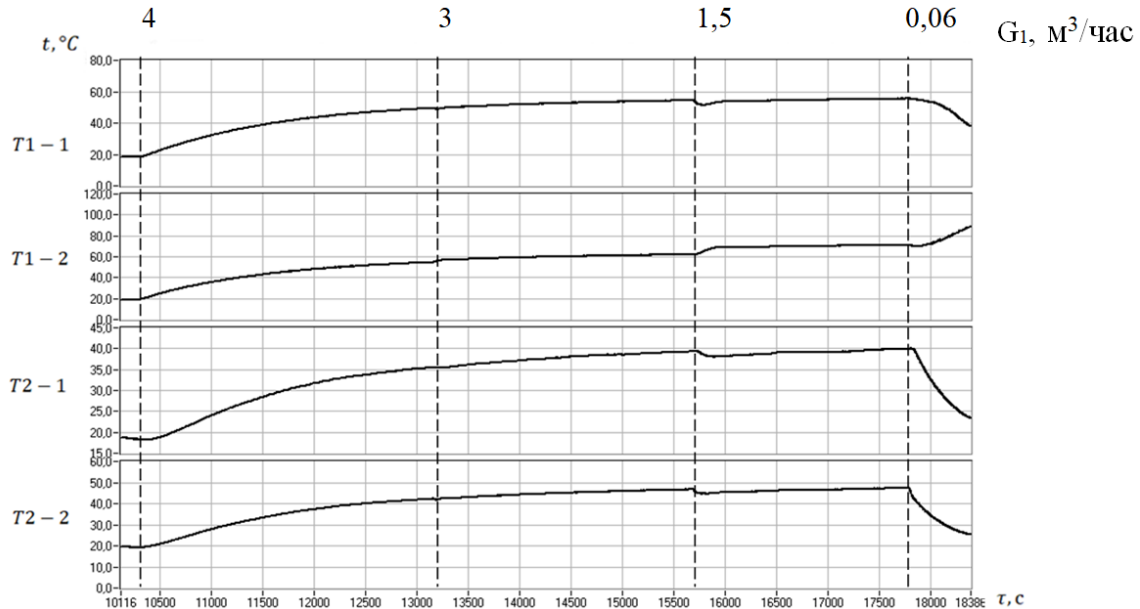


Рисунок 4 – График переходного процесса при изменении расхода теплоносителя первого контура

Figure 4 – Diagram of the transition process when the flow rate of the primary coolant changes

Обсуждение результатов

В процессе исследования режима скачкообразного перехода с мощности на мощность были получены графики переходной характеристики вида, которая является общей для всех трех режимов:

$$t_1 = f(\tau), t_2 = f(\tau) \quad (2)$$

$$t_{cp} = \frac{1}{2}(t_1 + t_2) = f(\tau) \quad (3)$$

При постоянных расходах в первом и втором контуре условие отводимой теплоты зависит от температурных условий в установке, с чем согласуются график (Рисунок 2). При внесении возмущения в систему происходит её перерегулирование, и температура на всех участках изменяется в соответствии закону:

$$t(\tau) = t_0 + \Delta t(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}), \quad (4)$$

где t_0 – начальная температура в контуре; Δt – величина изменения температуры в контуре между установившимися режимами; T – постоянная времени.

При исследовании режимов с переменными расходами, очевидно, что переходная характеристика будет подчиняться законам 2 и 3, а общий вид уравнения динамики в первом приближении останется в соответствии уравнению 4.

После внесения возмущения в систему (участки 2-4, Рисунок 3) происходит ее перерегулирование. Мощность электрообогрева остаётся постоянной, расход первого контура тоже, а значит, условие теплоотвода зависят от параметров во втором контуре. Из балансового уравнения (1), для того чтобы воспринять такое же количество теплоты,

при уменьшенном расходе, температура на входе в теплообменник должна уменьшиться, для увеличения температурного напора. С чем согласуется характеристика на Рисунке 3. Затем установка выходит на новый стационарный режим.

Интерес представляет исследование изменения расхода в первом контуре, поскольку нарушение условий нормально теплоотвода приводит к аварийным ситуациям и повреждению установки.

Из Рисунка 4 видно, что уменьшение расхода при постоянной мощности (участки 2-4) первого контура приводит к увеличению постоянной времени. Так для участка 1 $T \approx 392$ сек., в то время как для участка 2, постоянная времени составляет $T \approx 1300$ сек. Система увеличивает свою инерционность.

Рассмотрим участок 4. При останове насоса, во-первых, резко возрастает перепад температуры по первому контуру, поскольку система подчиняется уравнению баланса тепла:

$$N = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \quad (5)$$

где $t_{\text{вых}}, t_{\text{вх}}$ – температура на выходе из котла и входе в котел соответственно.

Во-вторых, уменьшается температура по второму контуру, что соответствует увеличению температурного напора в теплообменнике и согласуется с уравнением 1.

В-третьих, в контуре началось развитие естественной циркуляции. Обеспечение высокого уровня естественной циркуляции – важная задача при проектировании реакторных установок, поскольку в случае прекращения принудительной циркуляции, естественная циркуляция должна обеспечить нормальный отвод, по меньшей мере, остаточных тепловыделений. Скорость теплоносителя в нашем случае составляет около 5 см/с, что в условиях стенда приемлемо.

Заключение

В ходе работы на экспериментальной модели были исследованы лишь некоторые переходные характеристики нормальных и аварийных режимов работы, свойственные энергетическим установкам. Было получено качественное согласование с простейшими аналитическими моделями. Полученные данные служат исходным набором для дальнейшего расчета и обработки результатов. Стенд ФТ-100 позволяет так же реализовывать другие режимы работы, которые являются дальнейшими задачами для исследований. Вид переходных характеристик так же хорошо согласуется с результатами, описанными в работе [7].

В соответствии с тенденцией на использование кодов динамики и систем автоматического управления, полученный массив экспериментальных данных может использоваться для матрицы верификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев Д.Л., Пахомов А.Н., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Кабин С.В. Реакторная установка нового поколения РИТМ-200 для перспективного атомного ледокола. *Атомная энергия*. 2012;113(6):323-328.
2. Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Панов В.А., Пахомов А.Н., Полуничев В.И., Голубева Д.А. Продление срока эксплуатации и повышение безопасности судовых реакторных установок. *Атомная энергия*. 2012;113(6):328-333.
3. Кресов Д.Г., Куликов А.В., Оленская Е.В. Обеспечение повышенных ресурсных характеристик судовых реакторных установок. *Атомная энергия*. 2019;127(1):8-13.
4. Митенков Ф.М., Чирков В.А. Система автоматического управления. Нижний

- Новгород. Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. 2015;159.
5. Семенов В.К. Математическое моделирование теплофизических процессов в системе реактор-парогенератор. *Вестник ИГЭУ*. 2013;1:5-8.
 6. Будников В.И., Савихин О.Г., Чистов А.С. Численное моделирование нестационарных теплогидравлических процессов в контурах циркуляции водяного теплоносителя перспективной АЭС. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского им. Н.И. Лобачевского*. 2013; 1(1): 158-163.
 7. Гусев И.Н., Казанский В.Р., Витковский И.Л. Динамическая устойчивость энергоблока с ВВЭР-1200. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2017;3:22-32.
 8. Митенков Ф.М., Моторов Б.И. Нестационарные режимы судовых ядерных паропроизводящих установок. Л. Судостроение. 1970;200.
 9. Аношкин Ю.И., Дунцев А.В. Теплообменные процессы в ЯЭУ. Нижний Новгород. Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. 2015;139.
 10. Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. М. Энергоиздат. 1981;360.

REFERENCES

1. Zverev D.L., Pahomov A.N., Polunichiev V.I., Veshnyakov K.B., Kabin S.V. Reaktornaya ustanovka novogo pokoleniya RITM-200 dlya perspektivnogo atomnogo ledokola. *Atomnaya energiya*. 2012;113(6):323-328.
2. Petrunin V.V., Fadeev Yu.P., Panov V.A., Pahomov A.N., Polunichiev V.I., Golubeva D.A. Prodlenie sroka ekspluatatsii i povyshenie bezopasnosti sudovyh reaktornyh ustanovok. *Atomnaya energiya*. 2012;113(6):328-333.
3. Kresov D.G., Kulikov A.V., Olenskaya E.V. Obespechenie povyshennyh resursnyh harakteristik sudovyh reaktornyh ustanovok. *Atomnaya energiya*. 2019;127(1):8-13.
4. Mitenkov F.M., Chirkov V.A. Sistema avtomaticheskogo upravleniya. Nizhnij Novgorod. Nizhegorod. gos. tekhn. un-t im. R.E. Alekseeva. 2015;159.
5. Semenov V.K. Matematicheskoe modelirovanie teplofizicheskikh processov v sisteme reaktor-parogenerator. *Vestnik IGEU*. 2013;1:5-8.
6. Budnikov V.I., Savihin O.G., Chistov A.S. Chislennoe modelirovanie nestacionarnykh teplogidravlicheskiy processov v konturah cirkulyatsii vodyanogo teplonositelya perspektivnoy AES. *Vestnik Nizhegorodskogo universtiteta im. N.I. Lobachevskogo im. N.I. Lobacheskogo*. 2013;1(1):158-163.
7. Gusev I.N., Kazanskiy V.R., Vitkovskiy I.L. Dinamicheskaya ustojchivost' energobloka s VVER-1200. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. YAdernaya energetika*. 2017;3:22-32.
8. Mitenkov F.M., Motorov B.I. Nestacionarnye rezhimy sudovyh yadernykh paroproizvodyashchih ustanovok. L. *Sudostroenie*. 1970;200.
9. Anoshkin Yu.I., Duncsev A.V. Teploobmennye processy v YAEU. Nizhnij Novgorod. Nizhegorod. gos. tekhn. un-t im. R.E. Alekseeva. 2015;139.
10. Emel'yanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantinov L.V. Nauchno-tekhnicheskie osnovy upravleniya yadernymi reaktorami. M. Energoizdat. 1981;360.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Братыгина Виктория Сергеевна, студент 6 курса, кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», **Victoria S. Bratygina**, student 6 years of study, Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alexeev

университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Российская Федерация.
e-mail: vbratygina15@gmail.com

Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Сатаев Александр Александрович, аспирант, кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Российская Федерация.
e-mail: sancho_3685@mail.ru
ORCID: [0000-0003-2294-9877](https://orcid.org/0000-0003-2294-9877)

Aleksandr A. Sataev, PhD Student, Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Новиков Денис Ильич, магистрант 2 года обучения, кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Российская Федерация.
e-mail: greyIngreen27@gmail.com
ORCID: [0000-0001-6419-4295](https://orcid.org/0000-0001-6419-4295)

Denis I. Novikov, Master's Student 2 Years Of Study, Nuclear Reactors And Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University Named After R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Мельников Владимир Иванович, д.т.н., профессор, кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Российская Федерация.
e-mail: sgu-1@yandex.ru

Vladimir I. Melnikov, Dr. Sci. (In Engineering), Associate Professor, Nuclear Reactors And Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University Named After R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.